



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY**

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

**EXPERIMENTÁLNÍ PŘÍPRAVEK PRO TESTOVÁNÍ
CHLAZENÍ ROTORU DUTOU HŘÍDELÍ**

EXPERIMENTAL EQUIPMENT FOR TESTING OF COOLING BY HOLLOW SHAFT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Aleš Kraml

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Radek Vlach, Ph.D.

BRNO 2021

Zadaní bakalářské práce

Ústav: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student: **Aleš Kraml**
Studijní program: Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor: Mechatronika
Vedoucí práce: **doc. Ing. Radek Vlach, Ph.D.**
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Experimentální přípravek pro testování chlazení rotoru dutou hřídelí

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je využít a upravit experimentální pracoviště pro testování chlazení rotoru dutou hřídelí. Naplní bude na experimentálním přípravku, na kterém bude možné ověřit parametry chlazení dutou hřídelí, provést úpravy pro automatické provedení měření a jeho zpracování. Tento přípravek bude osazen tepelnými čidly, zařízením pro měření množství chladícího média a topným tělesem. Dále bude třeba navrhnout komunikaci přes I/O kartu s PC pro všechny senzory a nastavení topného výkonu. Celý proces měření by měl být plně automatizován.

Cíle bakalářské práce:

1. Rozbor stávajícího stavu zařízení.
2. Inovace mechanického provedení zařízení.
3. Návrh a inovace elektrické částí zařízení.
4. Provedení testovacího měření.

Seznam doporučené literatury:

ONDRUŠKA, E.; MALOUŠEK, A.: Ventilace a chlazení elektrických strojů točivých. SNTL Praha, 1985.

YUNUS, A.; TURNER, H.; CIMBALA, J.M.: Fundamental of Thermal-fluid Sciences. 3rd edition. McGraw Hill: Anstralia & New Zeland, 2008.

VLACH, R.: Tepelné procesy v mechatronických soustavách. Skripta. VUT Brno, 2009.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Tato práce se zabývá inovací experimentálního přípravku pro testování chlazení rotoru dutou hřídelí. Výsledkem této práce je funkční měřicí stanoviště umožňující provádět testovací měření pro různé konfigurace ventilátoru, vnitřní trubky a duté hřídele až do průměru 30 mm.

Abstract

This thesis describes the process of innovation of an experimental equipment for testing of cooling by hollow shaft. The outcome of this work is a functional measuring station allowing to perform test measurements for various configurations of fans, inner tubes and hollow shafts up to a diameter of 30 mm.

Klíčová slova

Chlazení dutou hřídelí, Chlazení elektrických točivých strojů, Měření odvedeného výkonu.

Keywords

Cooling by hollow shaft, Cooling of electric machines, Measurement of dissipated power.

Bibliografická citace

KRAML, Aleš. *Experimentální přípravek pro testování chlazení rotoru dutou hřídelí*. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132966>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce Radek Vlach.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Experimentální přípravek pro testování chlazení rotoru dutou hřídelí“ vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

21. května 2021

.....

Aleš Kraml

Poděkování

Děkuji tímto vedoucímu práce doc. Ing. Radku Vlachovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky během zpracování této bakalářské práce a také Bc. Martinu Ptáčkovi za rady týkající se měření otáček hřídele. Dále bych chtěl poděkovat všem, kteří mě během studia podporovali, zvláště pak mému otci.

Obsah

1. ÚVOD.....	9
2. CÍL PRÁCE.....	10
3. ANALÝZA PŮVODNÍHO STAVU ZAŘÍZENÍ.....	11
3.1 MECHANICKÁ STRÁNKA PŮVODNÍHO ZAŘÍZENÍ.....	11
3.2 ELEKTRICKÁ STRÁNKA PŮVODNÍHO ZAŘÍZENÍ.....	12
3.3 PRVNÍ SPUŠTĚNÍ	12
4. INOVACE MĚŘICÍHO ZAŘÍZENÍ.....	13
4.1 SEŘÍZENÍ	13
4.2 LOŽISKA.....	13
4.3 KLUZNÁ LOŽISKA.....	13
4.4 LOŽISKOVÉ PŘECHODKY	14
4.5 VÝKONNĚJŠÍ NAPÁJECÍ ZDROJ	15
4.6 NOVÝ MOTOR.....	16
4.7 SPOJKA.....	16
4.8 REDUKCE PRO PŘIPOJENÍ PRŮTOKOMĚRU	18
4.9 TEPLOTNÍ ČIDLA.....	19
4.10 KOMUNIKACE S PC	20
4.11 ZESILOVAČE SIGNÁLU Z TEPLOTNÍCH ČIDEL	20
4.12 MĚŘENÍ OTÁČEK HŘÍDELE	22
4.13 ŘÍZENÍ OTÁČEK	24
4.14 TOPNÁ SPIRÁLA	25
4.15 MĚŘENÍ PRŮTOKU VZDUCHU ZAŘÍZENÍM.....	25
4.16 GUI	26
4.17 KRYT SPOJKY	28
5. NÁVOD K OBSLUZE	29
6. TESTOVACÍ MĚŘENÍ.....	30
7. ZÁVĚR.....	33
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	34
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	36
SEZNAM OBRÁZKŮ	37
SEZNAM TABULEK.....	38
SEZNAM ELEKTRONICKÝCH PŘÍLOH.....	39

1. ÚVOD

Elektromotory jsou používány v mnoha aplikacích a rozsah jejich použití stále roste i díky rozvoji elektromobility. Jejich výhodou jsou malé rozměry a velký rozsah výkonů, na které mohou být konstruovány.

Motory o výkonu jednotek wattů najdeme v různých hračkách a přístrojích, výkonnější, několikasetwattové, najdeme v domácích spotřebičích. Výkonnější motory, s výkony v řádu desítek kilowattů jsou široce rozšířené v průmyslu pro pohon všech možných strojů a ve stále více se rozšiřujících elektromobilech a velké motory o výkonech v řádu stovek kilowattů až jednotek megawattů jsou používány například v lokomotivách, těžkém a energetickém průmyslu.

I přes jejich vysokou účinnost v celém rozsahu otáček vznikají při provozu elektromotorů nezanedbatelné ztráty. Tyto ztráty lze rozdělit na ztráty elektrické, způsobené průchodem proudu vinutím a ztráty mechanické, způsobené například třením v ložiscích. Tyto ztráty vedou k zahřívání motoru a snižují jeho účinnost. Během provozu se motory běžně zahřívají na teploty kolem 150 °C, hřídele asynchronních motorů mohou dosahovat teplot až 200 °C.

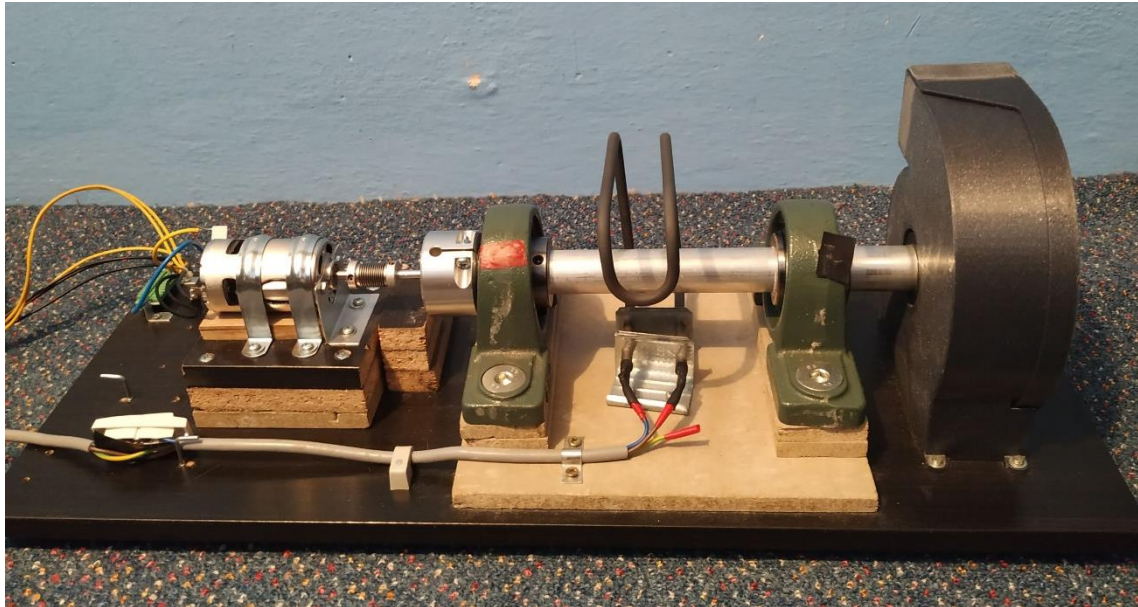
Motory jsou z tohoto důvodu vybaveny ventilátorem osazeným na hřídeli rotoru, který vhání do vnitřního prostoru vzduch, čímž motor ochlazuje. Společně se vzduchem je do prostoru motoru nasáván i prach z okolí. V případech, kdy je zanášení motoru nečistotami nežádoucí nebo je-li požadavek přímo na chlazení rotoru, je možné použít metodu chlazení rotoru dutou hřídelí, do níž je ventilátorem vháněn vzduch, který odebírá teplo z hřídele. Z provedených teplotních simulací vyplývá možnost použití tohoto způsobu chlazení v praxi. Výsledky teplotních simulací je nutné prakticky ověřit. O inovaci zařízení pro testování chlazení rotoru dutou hřídelí pojednává tato bakalářská práce.

2. CÍL PRÁCE

Cílem této práce je inovace experimentálního přípravku pro testování chlazení rotoru dutou hřídelí. Dílčími cíli jsou:

- Analýza stávajícího stavu zařízení
- Inovace mechanického provedení zařízení
- Návrh a inovace elektrické části zařízení
- Provedení testovacího měření

3. ANALÝZA PŮVODNÍHO STAVU ZAŘÍZENÍ



Obrázek 1: Původní stav zařízení.

3.1 Mechanická stránka původního zařízení

Základem zařízení je dřevotřísková deska o rozměrech 238x588x15 mm. Na spodní straně jsou v rozích uchyceny antivibrační gumové podložky. Ve vzdálenosti $l_1 = 250$ mm a $l_2 = 410$ mm od levého okraje jsou k desce upevněny dva ložiskové domky UCP206 osazené jednořadými kuličkovými ložisky s trvalou náplní UC206 o vnějším průměru $D_{\text{ložisko}} = 62$ mm a vnitřním průměru $d_{\text{ložisko}} = 30$ mm. V ložiscích je vložena hliníková hřídel o průměru $d_{\text{vnější}} = 25 \times 1$ mm a délce 250 mm. Protože má hřídel menší průměr než ložisko, je prostor mezi nimi vyplněn 3D tištěným mezikružím. Hřídel je v ložiscích uchycena dvěma stavěcími šrouby. Uvnitř hřídele je vložena trubka o průměru $d_{\text{vnitřní}} = 18 \times 1$ mm. Na pravé straně jsou hřídel i trubka upevněny na lopatkové kolo ventilátoru o průměru $d_{\text{kolo}} = 100$ mm, výšce $h_{\text{kolo}} = 36$ mm a 9 rovnými lopatkami. Uvnitř jsou hřídele spojeny 3D tištěným dílem, který slouží k obrácení proudu vzduchu.

Při otáčení hřídele dochází k nasání vzduchu středovým otvorem ventilátoru, vzduch je tažen vnitřní trubkou na konec, kde se obrátí směr proudění a vnější hřídel pokračuje vzduch k výstupu ventilátoru. Lopatkové kolo je umístěno ve 3D tištěné skříni ventilátoru, která je šrouby upevněna k základní desce. Vstupní otvor ventilátoru je kruhového tvaru a průměru $d_{\text{vstupní}} = 26,5$ mm.

Na opačném konci hřídele je přišroubována redukce na spojku. Redukce má vnitřní průměr $d_{\text{redukce}} = 30$ mm, proto je opět použita 3D tištěná přechodka. Hřídel je v redukci sevřena dvěma šrouby. Redukce je na jedné straně upevněna ke hřídeli, na straně druhé má trn o průměru $d_{\text{trn}} = 5$ mm.

K trnu je připojena vlnovcová spojka, která propojuje celou soustavu s motorem. Spojka má délku $l_{\text{spojka}} = 25$ mm a svou konstrukcí dovoluje jistou nesouosost motoru a k němu připojené soustavy. Motor je jedním zahnutým plechem tvaru L a dvěma plechovými pláty tvaru U upevněn ke dřevěnému podstavci. Na ložiskových domcích je položen odnímatelný kryt z dřevotřískové desky o délce $d_{\text{kryt}} = 180$ mm, šířce

$\check{s}_{kryt} = 240$ mm a výšce $v_{kryt} = 190$ mm. Tloušťka desek krytu je $t_{deska} = 10$ mm. Kryt zabraňuje únikům tepla do okolí.

3.2 Elektrická stránka původního zařízení

Zařízení je osazeno stejnosměrným modelářským motorem Graupner SPEED 700 s těmito parametry:

Tabulka 1: Parametry původního motoru. [1]

Napájecí napětí	4,8 – 12 V
Otáčky	19200 RPM (při 8,4 V)
Průměr hřídele	5 mm
Průměr motoru	44 mm
Délka motoru	66 mm

K motoru jsou připájeny přívodní vodiče. Mezi ložiskovými domky je kolem hřídele navinuta topná spirála v průměrné vzdálenosti $d = 50$ mm. Ke spirále je připojen trojžilný vodič, který je na dvou místech připevněn k základní desce a vyveden mimo prostor krytu. Při levém okraji zařízení je odstraněna vnější izolace přívodního vodiče, je přerušen nulový vodič a jeho konce jsou připojeny k solid state relé KSD215AC8. K základní desce je dále přišroubována 12pinová svorkovnice, ke které však není nic připojeno. Žádné další elektronické komponenty se na zařízení nenachází.

3.3 První spuštění

První spuštění proběhlo připojením na laboratorní zdroj 12 V. Po připojení se motor neroztočil, protože odebíral velký proud, který zdroj nebyl schopen pokrýt. Celou soustavu bylo obtížné otočit i rukou. Během otáčky bylo pozorovatelné místo vyžadující použití větší síly. Z toho důvodu byly zkoumány jednotlivé části s cílem zlepšení jejich funkce.

4. INOVACE MĚŘICÍHO ZAŘÍZENÍ

Bylo zapotřebí zjistit, která ze součástí zařízení má největší vliv na špatné otáčení. Po odpojení motoru a uchopení přechodky rukou, bylo možné soustavu otočit jen velmi těžší. Malý motor tak nemohl soustavu roztočit.

4.1 Seřízení

Pro bezproblémové otáčení bylo důležité dosáhnout co největší souososti všech součástí. Proto bylo seřízení provedeno jako první z úprav. Byly odejmuty ložiskové domky a motor a jejich pozice seřizena. Hřídel však bylo i po seřízení obtížné otočit. Během vykonání jedné otáčky bylo stále pozorovatelné místo vyžadující použití větší síly.

4.2 Ložiska

Dalšímu zkoumání byla podrobena ložiska a ložiskové domky. Ložiska jsou zakrytována kroužky a naplněna trvalou náplní maziva. Během otáčení docházelo k takovému pohybu hřídele, který způsoboval kývavý pohyb ložisek a ložiska tento pohyb špatně přenášela.

Při pokusu o vyjmutí ložiska z domku, které se provádí naklopením ložiska o 90° vpřed a následným vysunutím, často docházelo k zaseknutí ložiska v domku do té míry, že ani značnou silou jím nebylo možné otočit. Ložiska byla z domků vyjmuta, styčné plochy domků a ložisek očištěny od kovového otěru a namazány. To pomohlo lepšímu pohybu ložisek v ložiskových domcích. Na otáčení samotné však neměla tato úprava příliš vliv.

Bylo zvažováno odstranění krycích kroužků ložiska, vymytí příliš viskózního maziva a jeho nahrazení olejem. K tomuto řešení nebylo přistoupeno kvůli obavám z poškození ložiskové klece při odstraňování krycích kroužků. Poškození klece by znamenalo zničení ložiska a dodatečné náklady v řádu několika set korun.

4.3 Kluzná ložiska

Další možností bylo nahrazení kuličkových ložisek kluznými ložisky. Byly vytištěny prototypy a upevněny k zařízení. S novými ložisky bylo dosaženo výrazně vyšších rychlostí otáčení. I přes namazání styčné plochy kluzného ložiska by mohlo vlivem vysoké rychlosti otáčení docházet k otírání materiálu ložisek a jejich postupné degradaci. Tomu by bylo možné předejít zvýšením počtu perimetrů při tisku. Od použití tištěných kluzných ložisek však bylo upuštěno z důvodu měknutí plastu při relativně nízkých teplotách. Z toho důvodu byla znovu použita kuličková ložiska.

Bylo zjištěno, že po nahřátí komory a prohřátí ložisek se výrazně snižuje viskozita maziva a s ložisky je možné otočit menší silou.

4.4 Ložiskové přechodky

Původní přechodky z většího průměru ložiska na menší hřídel byly vyjmuty a u jedné z nich bylo zjištěno rozlomení. Přechodky byly nevhodně navrženy a vyrobeny – vnitřní průměr byl o 0,2 mm větší, takže při zašroubování stavěcích šroubů došlo k odtlačení hřídele od středu otáčení. Ke stejnému problému docházelo i u druhého ložiska, takže výsledný pohyb hřídele byl složený z rotace a krouživého pohybu osy trubky kolem středu ložisek.

Z výše uvedených důvodů bylo nutné navrhnout nové ložiskové přechodky, které hřídel v ložisku vystředily. Při návrhu bylo využito vysoké geometrické přesnosti ložisek – vnitřní průměr ložiska je přesný, vnitřní stěna je kolmá na čelo ložiska. Nová přechodka se tedy měla opřít o čelo ložiska a přesně vést hřídel středem. Na přechodce byly po obvodu umístěny dva otvory pro zašroubování stavěcích šroubů. Bylo vytištěno několik prototypů, jejichž vnější a vnitřní průměry se drobně lišily.

Žádný z nich však nevyhovoval, protože po nasazení na hřídel je nebylo možné usadit do ložiska. Změny rozměrů byly na tiskárnu s tryskou o průměru 0,4 mm malé.

Jako nejlepší se ukázalo vytištění pouze mezikruží bez opěrné plochy. 3D tiskárna při tisku lehce rozšiřuje šířku první vrstvy, což je pro tiskaře nežádoucí efekt. V tomto případě však malý přesah posloužil k vystředění přechodek v ložiscích. Důsledkem tohoto zlepšení bylo výrazné zmenšení házení hřídele a nežádoucích pohybů ložisek.



Obrázek 2: Různé prototypy ložiskových přechodek.

4.5 Výkonnější napájecí zdroj

Po analýze a vylepšení všech součástí bylo nutné obstarat výkonnější napájecí zdroj. Kvůli snížení celkových nákladů na zprovoznění zařízení byl pro tento účel vybrán napájecí zdroj ze starého PC. Zdroj v počítači slouží k napájení různých komponent s různými napěťovými úrovněmi. Procesor pracuje s napětím 5 V, ventilátory jsou napájeny 12 V, pevný disk pracuje na napětích 3,3; 5 a 12 V.

Vybraný zdroj měl štítkovou hodnotu výkonu $P = 450 \text{ W}$, takže při napětí $U = 12 \text{ V}$ byl schopen dodat proud I až 25 A. Takový proud měl být dostatečný k pokrytí odběru při rozjezdu motoru.

Aby bylo možné zdroj provozovat i bez připojení k základové desce počítače, bylo nutné propojit vývod PS_ON s nulovým potenciálem zdroje. Po této úpravě bylo možné zdroj používat.

Po připojení ke zdroji se motor pootočil a zdroj se vypnul. To bylo způsobeno citlivou ochranou proti přetížení, která byla ve zdroji integrována. Skoková změna odběru proudu může znamenat zkrat v napájených obvodech, což může vést ke zničení součástek, a proto je zdroj vybaven citlivou nadproudovou ochranou. K motoru byl do série připojen výkonový rezistor, který byl po chvíli zkratován připojeným vodičem. Toto ruční zkratování rezistoru mělo být později nahrazeno spínáním tranzistoru.

Motor se po této úpravě podařilo roztočit a ručním laserovým otáčkoměrem Voltcraft změřit jeho otáčky. Ty byly změřeny na 6500 ot./min. Dále byl ampérmetrem změřen odebíraný proud, a to $I = 10,6$ A. Další pokusy o roztočení motoru selhaly, motor se vždy po připojení ke zdroji pootočil a nadproudová ochrana zdroj vypnula.

4.6 Nový motor

Motor byl připojen na školní laboratorní zdroj, který při napětí $U = 12$ V poskytne proud I až 60 A. Motor se po připojení k tomuto zdroji roztočil, avšak na první pohled s nižšími otáčkami. Při pokusu odebíral konstantně proud $I = 20$ A. Po chvíli motor ještě více zpomalil a začal z něj vycházet kouř. Proto byl okamžitě odpojen a musel být nahrazen novým.

Pro tento účel byl v laboratoři vybrán stejnosměrný motor, který se používá například k pohánění elektrických skútrů. Štítkové parametry nového motoru jsou uvedeny v tabulce 2:

Tabulka 2: Parametry nového motoru. [2]

Výkon	350 W
Napětí	36 V
Proud	10 A
Otáčky	2400 RPM

4.7 Spojka

Nový motor byl oproti předchozímu výkonnější a značně větší. Motor bylo nutné upevnit k podstavci a spojit jej s hřídelí. Trn spojovacího dílu má průměr $d = 5$ mm, zatímco hřídel motoru má průměr $d = 8$ mm. Bylo zvažováno několik možností vhodného spojení.

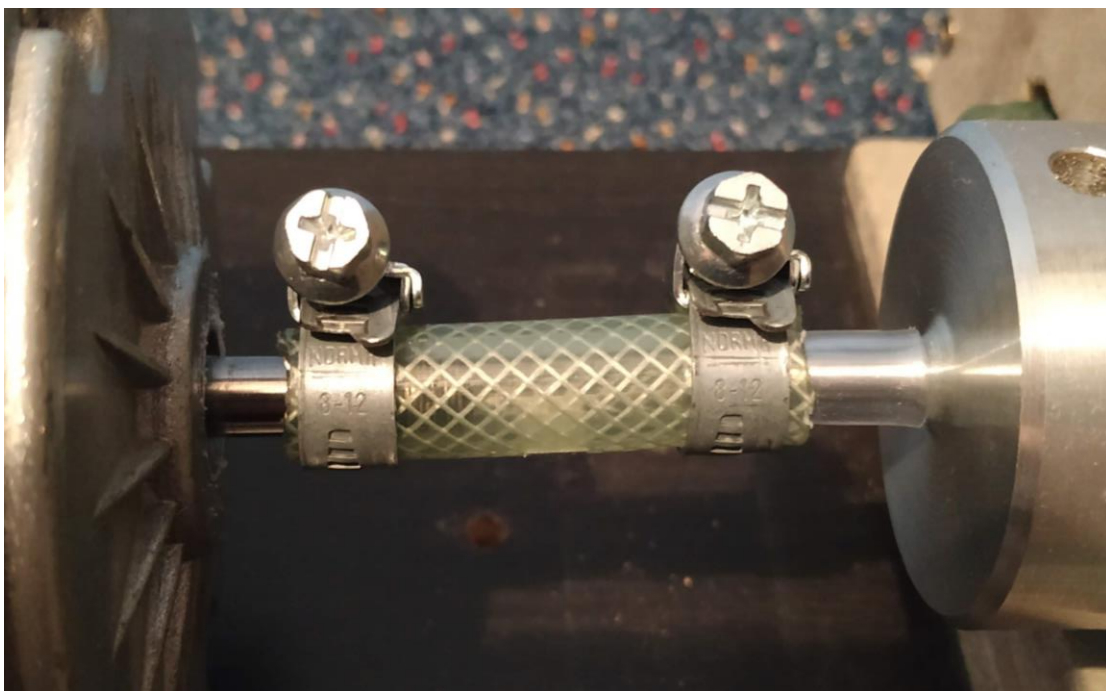
Spojení motoru s hřídelí musí být pohyblivé, aby bylo možné motor upevnit s určitou tolerancí. Jednou z možností bylo vyvrtat z jedné strany vlnovcové spojky větší otvor, do kterého by byla vsazena hřídel motoru. Na hřídeli motoru je vyřezán závit, kvůli kterému by nemuselo dojít k těsnému dolehnutí spojky na hřídel, proto od tohoto řešení bylo upuštěno. Další možností bylo vytištění vlastní spojky.



Obrázek 3: Prototyp spojky.

Výše uvedený 3D tištěný prototyp spojení sestává ze čtyř výstupků, které zapadnou do prohlubní v protikusu. Výstupky se směrem od podkladu zužují se stoupáním 5° , což umožňuje částečnou nesouosost a nerovnoběžnost. Výška vrstev tohoto výtisku je $h = 0,20$ mm a jeho povrch není hladký. Toto řešení nebylo dále rozvíjeno, protože by tření výstupků o sebe vydávalo hluk.

Pro jednoduchost byla zvolena spojka sestávající z hadičky o vnitřním průměru $d = 8$ mm, do níž byla z jedné strany vložena hadička o vnitřním průměru $d = 5$ mm. Tyto průměry odpovídají průměrům spojovaných součástí a jsou k nim uchyceny pomocí šroubovacích sponek. Toto spojení je levné, snadno rozebíratelné a splňuje požadavek pružného spojení motoru s hřídelem.



Obrázek 4: Spojka hřídele a motoru.

4.8 Redukce pro připojení průtokoměru

Na ventilátor bylo nutné připojit průtokoměr, aby bylo možné zjistit množství proteklého chladicího vzduchu. Skříň ventilátoru je dvojdielná, vytištěná z PLA. Vnější rozměr výstupu ventilátoru je obdélníkového tvaru s rozměry 48x53 mm. Použitý průtokoměr TSI 4040 má průměr vstupního připojení $d = 22$ mm. Pro připojení bylo nutné vyrobit přechodku z hranatého na kruhový tvar. Při návrhu byl požadavek na co nejmenší tlakovou ztrátu způsobenou změnou průřezu.

2. Stetige Querschnittsverengung

Bei stetiger Verengung gemäß Bild 5 treten keine Strahlablösungen auf, sofern $\alpha < 40^\circ$ bleibt. Die Verluste sind sehr gering und betragen etwa

$$\Delta p = 0,04 \frac{\rho w_2^2}{2} \quad (5).$$

Es wird somit in konvergenten Rohren fast der ganze Druck in Strömungsenergie umgesetzt.

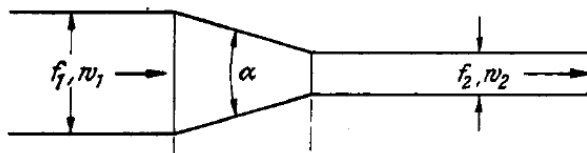


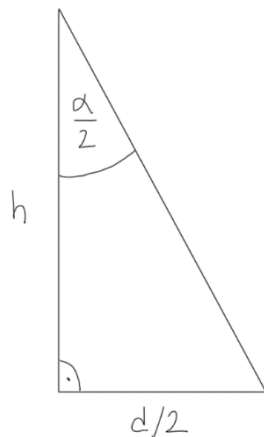
Bild 5. Stetig verengte Rohrleitung.

Obrázek 5: Úryvek o tlakových ztrátách v konfuzoru z VDI-Wärmeatlas. [3]

Na základě informací z VDI-Wärmeatlas byla stanovena minimální potřebná výška redukce podle vztahu:

$$h = \cotg\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot \frac{d}{2} = \cotg\left(\frac{40^\circ}{2}\right) \cdot \frac{54}{2} = 74,18 \text{ mm}, \quad (2)$$

kde d širší vnitřní rozměr redukce, h je hledaná výška.



Obrázek 6: Schematický náčrt polovičního řezu konfuzoru.

Pro ještě pozvolnější zúžení byla výška samotného zúžení zvětšena na $h = 110$ mm. Výsledný úhel, který svírají protilehlé stěny je roven:

$$2 \cdot \arctg\left(\frac{d/2}{h}\right) = 2 \cdot \arctg\left(\frac{54/2}{110}\right) = 27,58^\circ \quad (3)$$

Výsledná tlaková ztráta byla vypočtena z výše uvedeného vztahu, uvedeného v Obrázku 5:

$$\Delta p = 0,04 \cdot \frac{\rho \cdot w_2^2}{2}, \quad (4)$$

kde ρ je hustota vzduchu a w_2 je rychlost proudění v širší části redukce. Výsledná tlaková ztráta v redukci byla vypočtena ze změřeného průtoku hotovým zařízením. Maximální průtok byl změřen $Q = 28,5$ l/min. Ze známého průměru užší části určíme rychlost proudění podle vztahu:

$$w_2 = \frac{Q}{S}, \quad (5)$$

kde $[w_2] = m \cdot s^{-1}$, $[Q] = m^3 \cdot s^{-1}$ a $[S] = m^2$.

Výsledná tlaková ztráta pak je rovna:

$$\Delta p = 0,04 \cdot \frac{\rho \cdot \left(\frac{Q}{\pi \cdot \frac{d^2}{4}}\right)^2}{2} = 0,04 \cdot \frac{1,2759 \cdot \left(\frac{4,75 \cdot 10^{-4}}{\pi \cdot \frac{0,022^2}{4}}\right)^2}{2} = 39,8 \text{ mPa}, \quad (6)$$

kde ρ je hustota suchého vzduchu určená z [4]. Ve zúženém místě redukce byl navržen otvor pro osazení teplotním čidlem.

4.9 Teplotní čidla

Aby bylo možné vypočítat odvedený výkon, je nutné měřit teplotu na třech místech – v otápené komoře, na výstupu ventilátoru a teplotu okolí. Nebyl předpoklad, že by teplota v komoře přesáhla 100°C , z tohoto důvodu byla zvolena teplotní čidla LM35DZ.

Tabulka 3: Parametry teplotního čidla LM35DZ. [5]

Pouzdro	TO-92
Měřicí rozsah	0-100 °C
Přesnost	0,5 °C
Výstupní napětí	0-1 V
Napájecí napětí	4-30 V
Výstupní proud	10 mA

Teplotní čidlo má rozsah výstupního napětí 0-1 V a rozsah teplot 0-100 °C, změna teploty o 1°C tedy odpovídá změně napětí o 10 mV.

4.10 Komunikace s PC

Jedním z požadavků zadání bylo navrhnutí komunikace zařízení s PC přes I/O kartu. Dále bylo požadováno, aby bylo možné celé měření spouštět přímo z PC. Pro tento účel byla zvolena deska Arduino Uno, která nabízí dostatečný počet vstupních a výstupních pinů.

Tabulka 4: Nejdůležitější parametry Arduina. [6]

Počet digitálních I/O pinů	14
Počet PWM pinů	6
Frekvence PWM	490 Hz
Počet analogových pinů	6
Rozlišení ADC	10 bitů
Napěťová reference ADC	1,1 / 5 V

Kromě měření teploty na třech místech a průtoku vzduchu bylo navrženo i měření otáček hřídele a měřená data byla vykreslována v grafech. Za tímto účelem bylo vytvořeno v Matlabu GUI. Pro propojení Matlabu s Arduinem byl použit toolbox Matlab Support Package for Arduino Hardware [7]. Ten obstarává čtení a zápis dat na Arduino. Použití tohoto toolboxu s sebou neslo nevýhodu spojenou s měřením otáček.

4.11 Zesilovače signálu z teplotních čidel

Výstupem teplotního čidla LM35DZ je napětí v rozsahu 0-1 V. Vývojová deska Arduino Uno má 1,1V a 5V referenci sloužící ke komparaci napětí na analogových vstupech. Pro lepší rozlišení teploty byl výstupní signál z čidel zesílen zesilovačem v neinvertujícím zapojení.

Protože je každé z čidel na jiném místě, bylo potřeba pro každé z nich vyrobit samostatnou desku a nebylo možné využít více zesilovačů, které jsou v jednom pouzdře obsaženy. Výstupní napětí neinvertujícího zesilovače je dáno vztahem:

$$U_{out} = K \cdot U_{in}, \quad (7)$$

kde K je zesilovací činitel, který je pro neinvertující zapojení roven:

$$K = 1 + \frac{R_1}{R_{10}}, \quad (8)$$

kde R_1 je odpor řazený v záporné zpětné vazbě a R_{10} je odpor zapojený proti zemi. V tomto případě je potřeba docílit zesílení $K = 5$. Hodnoty odporů je vhodné volit v řádu desítek k Ω . Nižší hodnoty příliš zatěžují zesilovač a způsobují velkou spotřebu proudu, vyšší hodnoty v řádu stovek k Ω až jednotek M Ω způsobí velkou náchylnost na rušení vlivem šumu. Z těchto důvodů byla hodnota R_{10} zvolena 10 k Ω . Hodnota R_1 pak byla vypočtena ze vztahu:

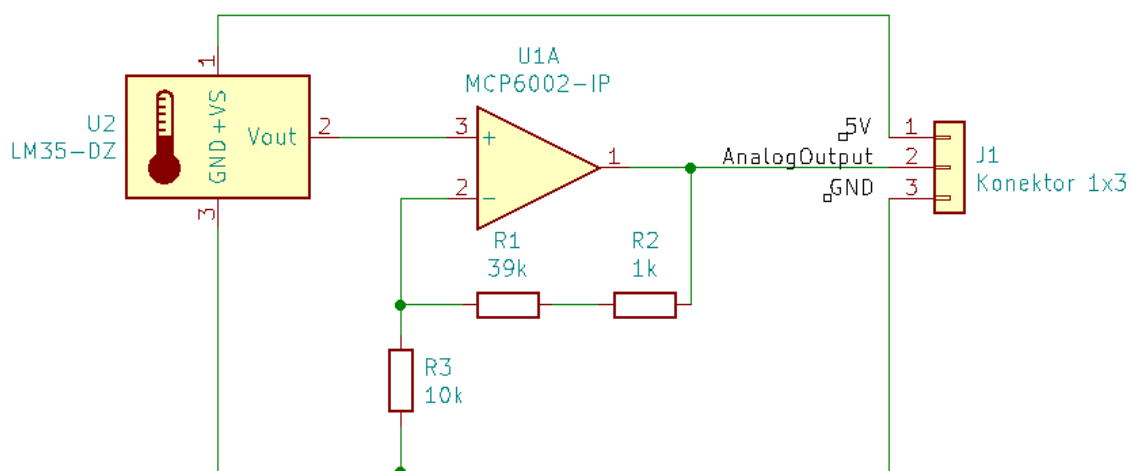
$$K_{teplotní\ čidla} = 5 = 1 + \frac{R_1}{10k}, \quad (9)$$

z něhož vyplývá $R_1 = 40$ k Ω . Takovou hodnotu však neobsahuje žádná řada rezistorů. Nejbližší jsou této hodnotě rezistory z řady E12 39 k Ω a 47 k Ω . Tato řada je běžnou řadou

rezistorů s tolerancí 5 %. Aby bylo dosaženo co nejbližšího zesílení požadované hodnotě, byl k rezistoru 39 k Ω připojen sériově druhý rezistor R₂ s odporem 1 k Ω .

Tolerance hodnoty použitých rezistorů se pohybuje v rozmezí 5 %. To by v případě, kdy by hodnoty rezistorů ležely každá na opačném konci intervalu tolerance znamenalo nepřesnost zesílení signálu 8 %. Skutečná hodnota odporů se však příliš nelišila a nepřesnost byla vykompenzována softwarově. Pro snadnější manipulaci a případnou výměnu jsou vstup i výstup plošného spoje osazeny dutinkovými lištami, do kterých se na jedné straně zapojí kabely vedoucí k teploměru, na straně druhé pak kabely vedoucí k Arduino

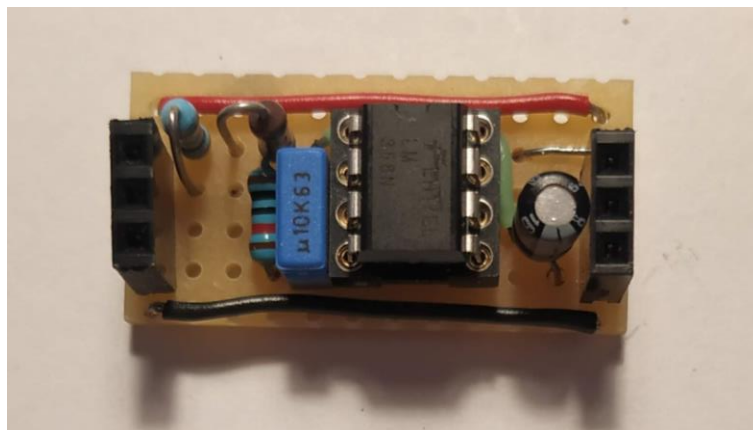
Po zapojení obvodu se zesilovačem LM358 [8] a nahřání vytápěné komory docházelo k ustálení výstupního napětí na hodnotě 3,7 V, což odpovídá teplotě 74 °C. Toto nebylo způsobeno nastolením tepelné rovnováhy v zařízení, ale tím, že použitý zesilovač nebyl typu rail-to-rail a výstupní napětí dosahovalo maximálně hodnoty napájecího napětí snížené o 1,3 V. Z toho důvodu byl vybrán zesilovač MCP6002IP [9], který je typu rail-to-rail a má vývody na stejných místech, takže nebylo nutné přepracovávat vyrobený plošný spoj.



Obrázek 7: Schéma zapojení zesilovače napětí z teplotních čidel.

Signál ze zesilovače je přiveden do Arduino třemi spletenými vodiči, aby bylo zabráněno vzniku rušení. Při průchodu elektromagnetické vlny jedním závitem vodiče dojde k indukovaní napětí, které by ovlivnilo výslednou měřenou hodnotu. Při propletení vodičů však vlna kabelem prostoupí a v dalším závitě je indukováno stejné napětí opačné polarity, čímž dojde k vyrušení. Vodiče jsou barevně odlišeny, a to červený vodič pro +5 V, bílý vodič pro signál a černý vodič pro nulový potenciál. Barevné označení je zavedeno z důvodu lepší orientace v zapojení a kvůli případným opravám a změnám v zařízení.

Snímač teploty v komoře byl zakryt hliníkovým plechem s podobným povrchem jako má hřídle, aby snímač černé barvy neabsorboval více tepla při přímém osálení topnou spirálou.



Obrázek 8: Deska zesilovače signálu z teplotního čidla.

4.12 Měření otáček hřídele

Měření otáček je možné realizovat více způsoby: optickou závorou, odrazem infračerveného paprsku od kontrastních ploch nebo magneticky pomocí Hallové sondy.

Měření optickou závorou bylo nevhodné, protože by na hřídel musel být umístěn výstupek, který by závoru přerušoval, což by znamenalo další díl navíc. Měření odrazem by bylo možné realizovat například nalepením papíru s kontrastním potiskem na hřídel. Toto řešení nebylo použito, protože se při vyšších provozních teplotách zvyšuje riziko odlepení. Nejvhodnější pro měření byla Hallova sonda z důvodu snadné montáže magnetu na hřídel a kvůli nemožnosti zarušení okolním světlem jako u předchozích metod.

Plochý neodymový magnet o rozměrech 10x6x2 mm byl vložen doprostřed spojky. Pro měření byl vybrán modul KY-024 osazený Hallovým čidlem 49E. Modul je osazen zesilovačem LM393 a má jeden analogový a jeden digitální výstup, jehož citlivost je možné nastavit trimrem.

Měření otáček je realizováno pomocí funkce interrupt. Ten při náběžné/sestupné hraně nebo změně napětí přeruší běžící kód a provede předepsanou funkci. Tuto funkci však použitý Matlab Arduino Support Package neobsahuje. Arduino samotné je schopné měřit teplotu a zároveň provádět měření otáček funkcí interrupt, výsledky by bylo možné odesílat do Matlabu a pouze je vykreslovat. Tím by byl využit plný potenciál Arduina. V této fázi vývoje by však toto řešení znamenalo opuštění celého napsaného softwaru a nový začátek. Proto bylo nutné nalézt jiné řešení.

K modulu s Hallovou sondou bylo připojeno Arduino Mini Pro, kterým byly měřeny otáčky [10]. Prvotním plánem bylo změřené otáčky přepočítávat na napětí, které bude přivedeno na analogový výstup Arduina Mini. Toto napětí mělo být měřeno Arduinem Uno, přepočteno zpět na otáčky a vykresleno do grafu.

Jako první bylo testováno vypisování změřených otáček přes sériovou komunikaci do PC. Tento postup fungoval bezchybně a Arduinem změřené otáčky hřídele odpovídaly otáčkám změřeným laserovým otáčkoměrem. Současné měření otáček se zápisem odpovídajícího napětí na výstupní pin však nefungovalo a měřené otáčky dosahovaly hodnot v řádu statisíců. Bylo zjištěno, že funkce analogWrite() a interrupt používají stejný časovač a dochází tak k jejich vzájemnému rušení. Z toho důvodu bylo zvoleno řešení odesílání změřených otáček přes I2C do hlavního Arduina.

Zpočátku byl program pro otestování nahrán pouze do Arduina Mini a data z něj byla odesílána přes sériovou linku do počítače. Změřené otáčky však byly

několikanásobně vyšší než otáčky skutečné. Za snímač bylo nutné zařadit RC článek, který filtruje rušení. Motor má maximální hodnotu otáček uvedenu na štítku, a to 2400 RPM při napájení 36 V. Tyto otáčky odpovídají 40 otáčkám za sekundu. Časová konstanta byla zvolena na jednu pětinu doby otáčky. Časová konstanta RC článku je dána vztahem:

$$\tau = R \cdot C = 4,7 \text{ ms} \quad (10)$$

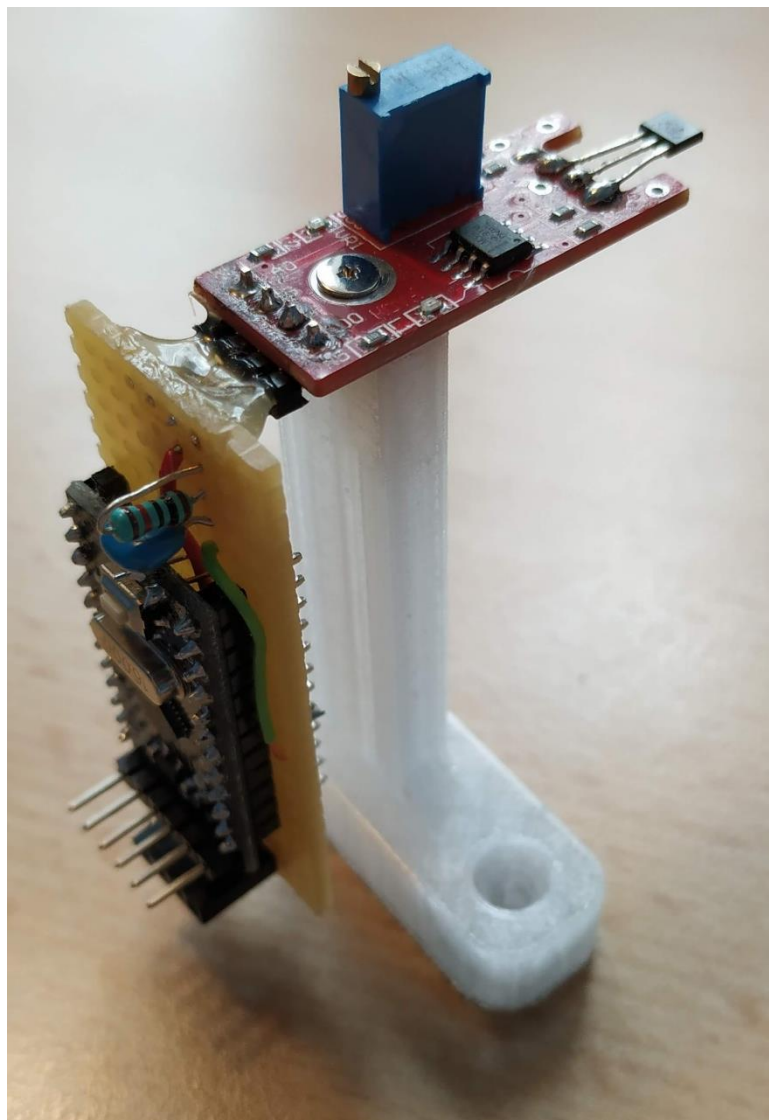
Byl vybrán kondenzátor o kapacitě $C = 470 \text{ nF}$ a k němu dopočten odpor podle vztahu:

$$R = \frac{\tau}{C} = \frac{4,7 \cdot 10^{-3}}{470 \cdot 10^{-9}} = 10 \text{ k}\Omega \quad (11)$$

Dalším krokem bylo propojení Arduina Mini s hlavním Arduinem Uno. Komunikace přes rozhraní I2C probíhá po dvou kabelech. Jedním je signál hodin, druhým pak data [11]. Dále muselo být Arduino Mini připojeno k napájení 5 V. Pro snazší manipulaci s měřidlem otáček bylo Arduino Mini a k němu připojený modul s Hallovou sondou propojeny na desce plošného spoje a byl tak vytvořen kompaktní modul pro měření otáček. Na desce byl také zhotoven RC článek popsany výše.

Plošný spoj byl k základové desce uchycen pomocí 3D tištěného dílu. Při návrhu stojánku byl kladen důraz na možnost nastavení polohy Hallové sondy vůči magnetu umístěnému ve spojce. V základové desce se ve vzdálenosti 20 mm od středu spojky nachází otvor, ve kterém byla uchycena podpěra původního motoru. Tohoto otvoru bylo využito pro uchycení stojánku pro měřič otáček. Stojánek je možné otáčet kolem osy šroubu, modul samotný je pak ke stojánku přišroubován úzkým šroubem s plochou širokou hlavou, díky čemuž je možné nastavit polohu modulu v rozmezí 6 mm ve směru vpřed/vzad i do stran. Tak je možné dosáhnout ideální polohy čidla vůči magnetu.

Arduino Mini pracující jako slave odesílá na vyžádání mastera čtyřbajtový string číslic. Jednotlivé číslice představují změřené otáčky rozdělené na jednotlivé číslice v ASCII kódu. Protože pouze master určuje délku odesílaného řetězce, je tato délka nastavena konstantně na 4 čísla. Pokud je odesíláno pouze trojmístné číslo, je první znak nahrazen hodnotou 32 [12], která v kódu ASCII představuje mezeru. Další číslice reprezentující řád stovek, desítek a jednotek odpovídají příslušným číslům v ASCII. Tento string je v GUI rozdělen na jednotlivá čísla a jsou vypočteny otáčky.



Obrázek 9: Kompaktní modul pro měření otáček se stojánkem.

4.13 Řízení otáček

Řízení otáček je realizováno pomocí modulu se dvěma výkonovými tranzistory, který umožňuje spínání až 400W zátěže pomocí PWM. Na vstupní svorkovnici modulu je přivedeno napájecí napětí v rozsahu 5-36 V. Kvůli vyššímu možnému odběru jsou MOS-FETy zapojeny paralelně. Toto zapojení umožňuje bez chlazení konstantní odběr až 15 A [13], což s malou rezervou vyhovuje požadavkům. Tento modul byl vybrán kvůli jeho příznivé ceně a odpadnutí nutnosti návrhu a výroby vlastního modulu pro řízení otáček.

Na vstup modulu byla připájena dutinková lišta, do níž je zasunut protikus s vodiči přivedenými na nulový potenciál a pin 11 na Arduino, kterým je ovládána střída PWM signálu. Modul je osazen indikační LED, která podle zadané střídavy mění svůj jas, čímž je možné opticky zkontrolovat aktuální stav.

4.14 Topná spirála

Topná spirála s připojenými vodiči, která byla od počátku součástí zařízení na sobě nenesla žádné označení ani informaci o výkonu. Proto bylo provedeno měření za účelem zjištění výkonu spirály. Na přívodní vodiče studené spirály byly přiloženy svorky multimetru a byl změřen odpor mezi svorkami. Změřená hodnota $R_{studené} = 64,8 \Omega$. Bylo nutné zjistit, zda se odpor spirály mění v zahřátém stavu. Spirála byla připojena k síti, po chvíli odpojena a byl změřen její odpor $R_{teplá} = 65,7 \Omega$. Bylo zjištěno, že hodnota odporu se v závislosti na teplotě mění jen velmi málo. Ze známého napětí $U = 230 \text{ V}$ sítě byl vypočten výkon spirály podle vztahu:

$$P = \frac{U^2}{R} = \frac{230^2}{64,8} = 816 \text{ W} \quad (12)$$

Tato hodnota byla použita pro výpočet střídavy ze zadaného požadovaného výkonu.

4.15 Měření průtoku vzduchu zařízením

Měření průtoku vzduchu je spolu s měřením teplot klíčové k zjištění efektivity chlazení rotoru dutou hřídelí. K měření byl použit kalibrovaný průtokoměr TSI 4040. Tím je možné měřit teplotu procházejícího plynu a průtok v rozmezí 0-300 l/min [14]. Přístroj je napájen adaptérem. Průtok a teplota jsou zobrazovány na displeji, pro automatické měření však bylo nutné zpracovávat měřené údaje pomocí Arduina a vykreslovat je v PC.

Průtokoměr je vybaven 8pinovým mini-DIN konektorem, kterým je možné jej připojit k PC přes rozhraní RS232. Tímto konektorem však není vybaven žádný ze současných počítačů. Proto byl zakoupen převodník tohoto rozhraní na USB. Původním plánem bylo číst změřené hodnoty průtoku z USB a vypisovat je do grafu v Matlabu. Výrobce nabízí program k ovládání zařízení z počítače, který však nelze použít pro měření Arduinem. Vlastní vytvoření komunikace s průtokoměrem by však bylo příliš náročné a výsledek by nepřinesl benefity. Proto bylo k měření průtoku použito napětíového výstupu z průtokoměru. Aktuální průtok měřidlem je charakterizován napětím na pinu 3 mini-DIN konektoru. Maximální možný průtok 300 l/min odpovídá napětí 10 V [14]. Měřicí rozsah Arduina je 0-5 V, průtoku 150 l/min, který by odpovídal 5 V však zařízením nebude nikdy dosaženo, předpokládaná hodnota průtoku byla nižší.

Kabel s mini-DIN konektorem na jedné straně a D-Sub 9pin konektorem na straně druhé je přiveden do konektoru na desce plošného spoje určené pro zesilovač výstupního napětí průtokoměru. Napětí bylo nutné zesílit, aby bylo dosaženo vyšší přesnosti měření pokrytím celého rozsahu AD převodníku.

Potřebné zesílení bylo zjištěno tak, že motor byl připojen na nejvyšší možné napětí a byl změřen průtok vzduchu ventilátorem $Q = 28,5 \text{ l/min}$. Výstupní napětí pro tento průtok odpovídá

$$U_{\max \text{ změřené}} = \frac{Q_{\text{změřený}}}{Q_{\text{maximální}}} \cdot U_{\max Q} \quad (13)$$

Po číselném dosazení:

$$U_{\max \text{ změřené}} = \frac{28,5}{300} \cdot 10 = 0,95 \text{ V} \quad (14)$$

Tuto hodnotu bylo potřebné zesílit na 5 V. Užitím vztahu (8) byly vypočteny hodnoty rezistorů $R_1 = 47 \text{ k}\Omega$ a $R_{10} = 12 \text{ k}\Omega$, což odpovídá zesílení

$$K_{\text{průtokoměr}} = 1 + \frac{R_1}{R_{10}} = 1 + \frac{47\text{k}}{12\text{k}} = 4,92 \quad (15)$$

Hodnota zesílení byla záměrně volena o něco nižší než 5, protože maximální průtok se může mírně zvýšit. K tomu může dojít například ohřátím komory na vyšší teplotu a větším snížením viskozity maziva v ložiscích. Proto je v zesílení volena mírná rezerva. Zesílené napětí je kabelem přivedeno na analogový vstup Arduina A0, odkud je měřeno a vyhodnocováno.

4.16 GUI

Po stisknutí tlačítka Run v hlavním okně Matlabu dojde k vykreslení nového okna s prázdnými grafy [15]. Pro přehlednost jsou data rozmístěna v pěti grafech v okně. Obsluha zařízení tak má stálý přehled o vývoji měřených hodnot. Pro lepší názornost jsou měřítka všech grafů teplot stejná. Pod grafy teploty je umístěn graf otáček hřídele a průtoku vzduchu. X-ové osy všech grafů se každou sekundu měření posouvají a je tak vidět vývoj měřených hodnot v čase. V pravé dolní části jsou umístěna zadávací pole požadovaného výkonu topné spirály a požadovaných otáček. Celé měření je spouštěno tlačítkem Spuštění měření, pozastavit jej je možné tlačítkem Pauza.

Do zadávacích polí požadovaného výkonu topné spirály a požadovaných otáček je možné zapsat žádané hodnoty a je možné je kdykoli v průběhu měření změnit. Zadaná hodnota požadovaného výkonu je zaokrouhlena a přepočtena na střidu PWM. Relé [16] je spínáno pomalou PWM s periodou $T = 10 \text{ s}$. Tato perioda by byla příliš dlouhá, pokud by spirála byla používána na vzduchu – v neseprnutém čase by docházelo k výraznému ochlazování. Pokud je však spirála uzavřena v komoře, nedochází ke kolísání teplot ani při takto dlouhé periodě. Časovač každých 100 ms inkrementuje proměnnou, která je v každém kroku porovnávána s požadovanou střidou. Pokud je hodnota proměnné nižší než hodnota střidy, je sepnuto relé. Pokud je hodnota naopak vyšší, relé je rozepnuto. Na konci periody se inkrementovaná proměnná nuluje a proces se spouští znovu. Délka jednoho kroku 100 ms byla zvolena právě takto, protože umožňuje realizovat spínání podle požadované střidy s přesností na setiny. Při zvolení větší délky kroku by bylo možné nastavit výkon méně přesně.

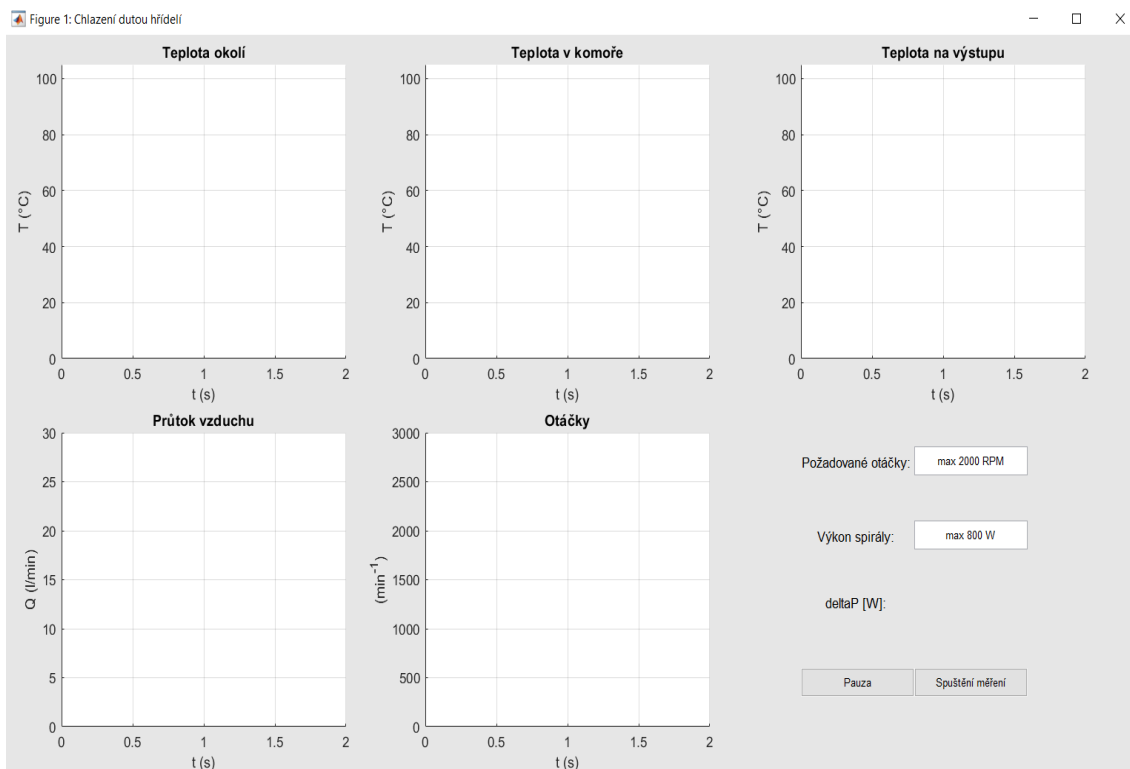
Motor při napájení nižším napětím dosahuje nižších otáček. Při napájení 30 V je to u tohoto motoru 2000 RPM. Zařízením změřené otáčky jsou vyšší než předpokládané otáčky motoru, poměr změřených otáček ku napájecímu napětí však zůstává přibližně stejný.

Na analogový vstup A0 je přiveden zesílený signál z průtokoměru. Při maximálních otáčkách motoru bylo změřeno napětí 4,67 V, což odpovídá průtoku 28,5 l/min. Změřená hodnota napětí na vstupu je přepočtena na výsledný průtok a vykreslena v grafu.

Časovač každou sekundu spouští funkci pro měření napětí a vykreslení grafů [17]. Výstup teplotních čidel, průtokoměru i otáčkoměru je zapisován do dvouřádkové matice o n sloupcích, kde n odpovídá počtu sekund měření. V prvním řádku matice je uveden čas, v druhém naměřená hodnota. Z těchto matic je tak možné zkontrolovat kteroukoli naměřenou hodnotu v libovolném čase. Matice je také možné použít jako výstup z měření. Na základě těchto matic jsou vykreslovány grafy. Dále je v této funkci vypočítávána aktuální hodnota odváděného výkonu. Po každém proběhnutí funkce je přičten čas 1 sekunda a funkce se spouští znovu až do ukončení měření uživatelem. Odvedený výkon, značený „ ΔP “ je vypočten podle vztahu:

$$\Delta P = Q \cdot c_{p,vzduch} \cdot (t_{výstupní} - t_{okolí}), \quad (16)$$

kde Q je průtok v $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $c_{p,vzduch}$ je měrná tepelná kapacita vzduchu při konstantním tlaku určená z [4] v $\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$, $t_{výstupní}$ a $t_{okolí}$ jsou teploty ve $^\circ\text{C}$.

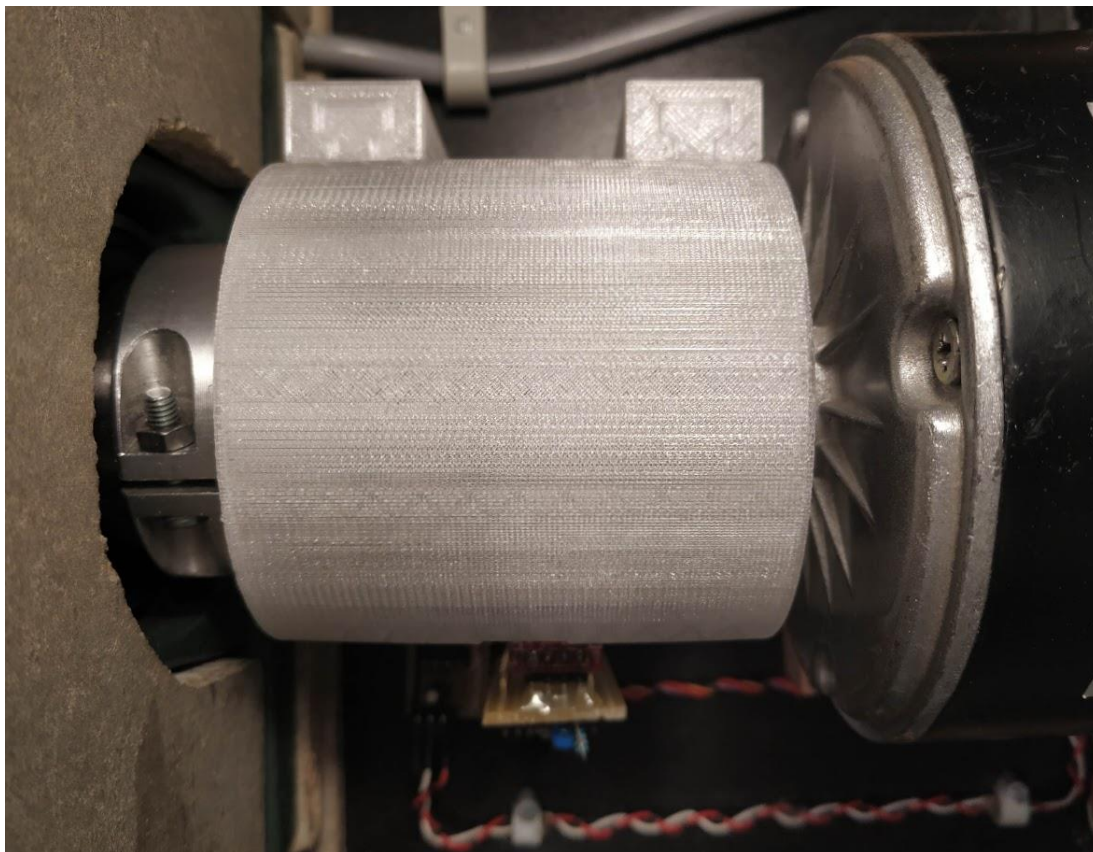


Obrázek 10: Ukázka GUI.

4.17 Kryt spojky

Motor při provozu dosahuje otáček až 2000 RPM. Většina točící se části zařízení je během provozu zakryta krytem otápěné komory a skříní ventilátoru. Část kolem spojky zůstala nezakryta. I přes veškerou obezřetnost obsluhy by mohlo dojít ke zranění osoby nebo poškození zařízení, v důsledku nechtěného dotyku točící se části. Mohlo by také dojít k zachycení a namotání části oděvu.

Z důvodu zvýšení bezpečnosti je prostor kolem spojky chráněn odnímatelným bezpečnostním krytem proti dotyku s pohyblivou částí.

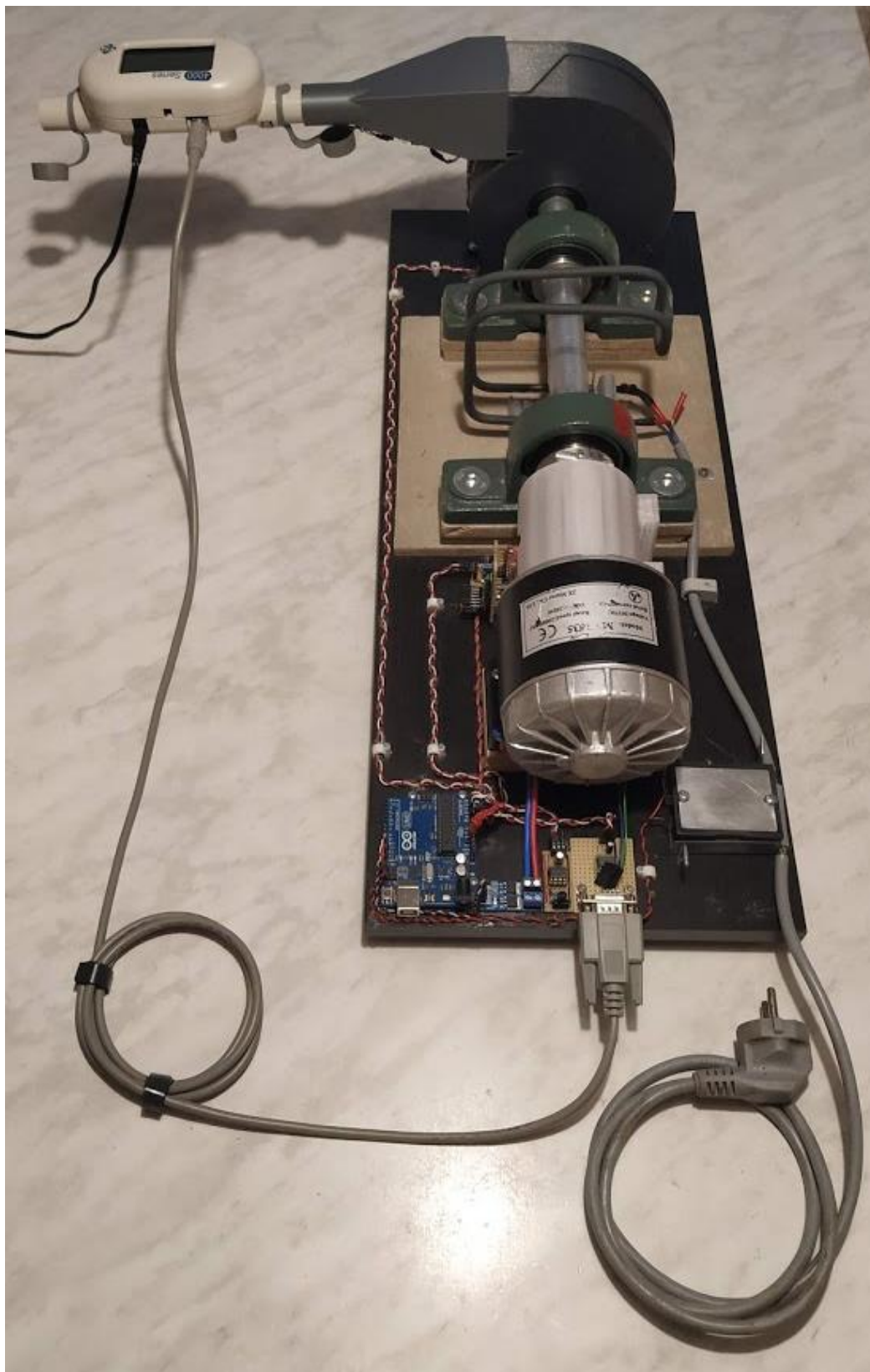


Obrázek 11: Kryt spojky.

5. NÁVOD K OBSLUZE

- a) Zakryjte spojku.
- b) Na svorkovnici PWM modulu připojte zdroj napětí. Polarita je označena na svorkovnici. Napětí nesmí přesáhnout 36 V, doporučený maximální odběr zdroje je 10 A.
- c) Na výstupní redukci ventilátoru nasad'te průtokoměr. Vstup průtokoměru je označen šipkou na jeho spodní straně.
- d) K průtokoměru připojte přiložený napájecí adaptér a zapněte průtokoměr.
- e) Přívodní vidlici topné spirály zapojte do zásuvky.
- f) K průtokoměru připojte kabel s mini-DIN konektorem, druhý konec zapojte do protikusu na desce zařízení a zašroubujte šrouby konektoru.
- g) Arduino pomocí kabelu USB-A připojte k počítači.
- h) Na počítači s nainstalovaným Matlabem a toolboxem Arduino Hardware Support Package spus'te kód GUI.m.
- i) Tlačítkem Run v horní části obrazovky spus'te kód.
- j) V zadávacím poli Výkon spirály zvolte libovolnou hodnotu v rozmezí 0-800 W.
- k) V zadávacím poli Požadované otáčky zvolte libovolnou hodnotu v rozmezí 0-2000 RPM. Obě hodnoty je možné měnit bez nutnosti pozastavení měření.
- l) Spus'te stisknutím tlačítka Spus'tění měření.
- m) Měření je možné pozastavit tlačítkem Pauza.
- n) Hodnota „*delta P*“ představuje odvedený výkon ze zařízení, po jejím ustálení tuto hodnotu odečtete. Hodnota je ve watttech.

6. TESTOVACÍ MĚŘENÍ



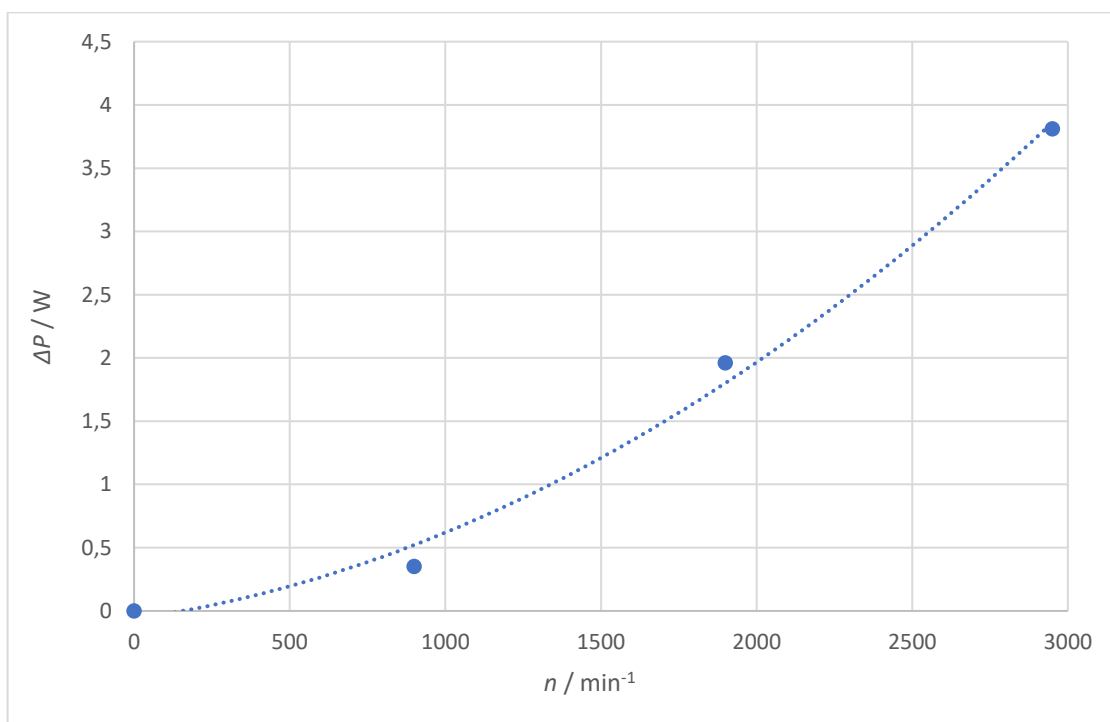
Obrázek 12: Finální podoba zařízení.

Na závěr bylo provedeno testovací měření při třech různých napájecích napětích motoru, a to 10, 20 a 30 V a teplotu komory $T_{komora} = 80\text{ °C}$. Po ustálení hodnoty odvedeného výkonu byly odečteny hodnoty otáček, průtoku, odvedeného výkonu a teploty v komoře. Změřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 5:

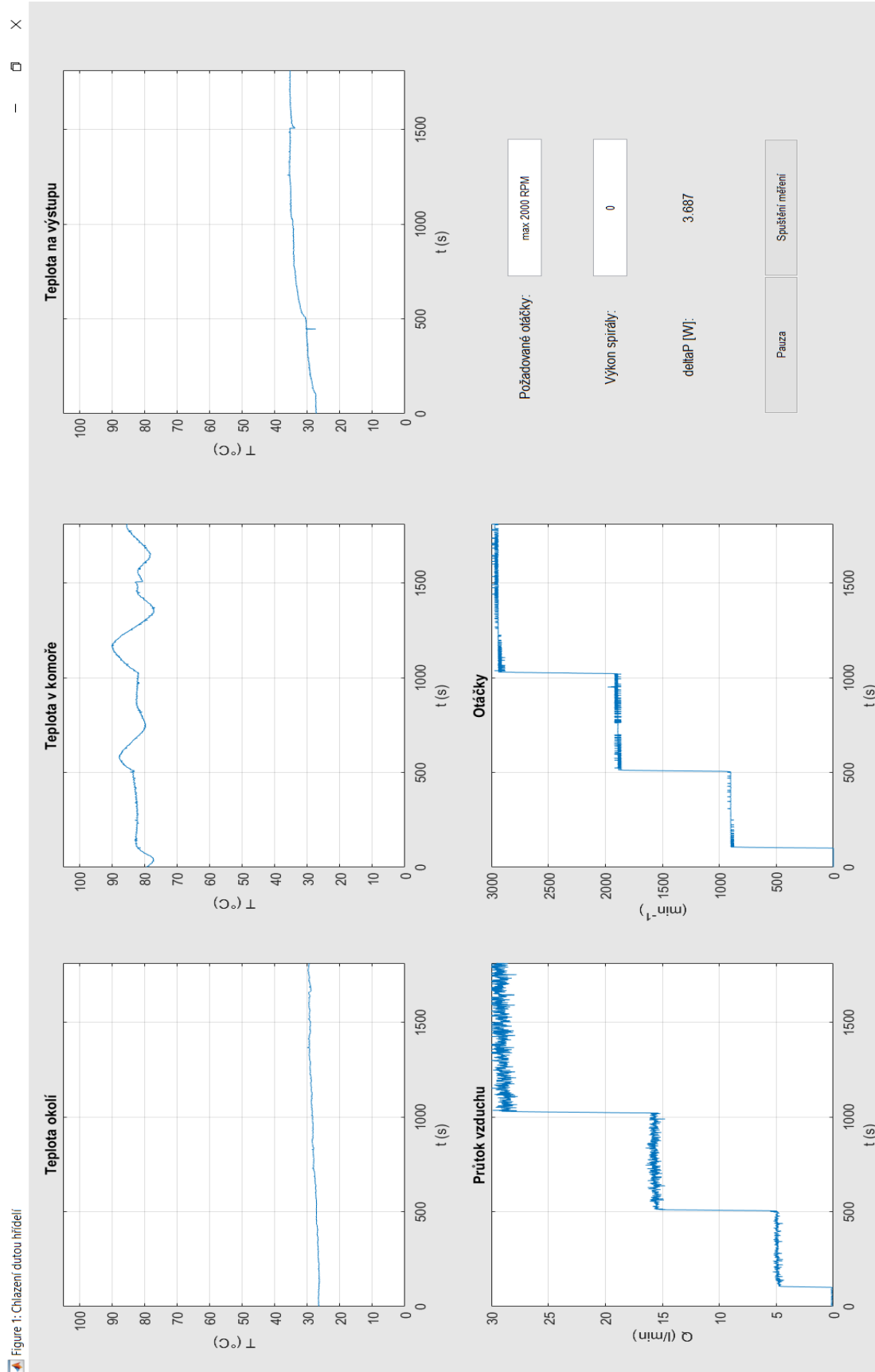
Tabulka 5: Ustálené hodnoty z testovacího měření.

Napětí (V)	0	10	20	30
Otáčky (min^{-1})	0	900	1900	2950
Průtok (l/min)	0	5,1	15,6	29,1
ΔP (W)	0	0,35	1,96	3,81
Teplota komory (°C)	80	82	82	85

Zařízením změřené otáčky jsou vyšší než reálné otáčky. Poměr změřených otáček ku napájecímu napětí však zůstává přibližně stejný.



Graf 1: Závislost odvedeného výkonu na otáčkách.



Obrázek 13: Průběhy měřených veličin při testovacím měření.

7. ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývala inovací experimentálního zařízení pro chlazení rotoru dutou hřídelí.

Základem původního zařízení byla deska osazená modelářským motorem, ventilátorem a dutou hřídelí uloženou v ložiscích, která byla obklopena topnou spirálou. Dále bylo na desce umístěno relé určené ke spínání spirály, jeho vývody však nebyly připojeny.

Prvním krokem byl pokus o roztočení soustavy. Bylo provedeno seřízení soustavy a bylo zjištěno, že v původním zařízení byly použity nevhodné ložiskové přechodky, kvůli kterým se zařízení špatně otáčelo a byla namáhána ložiska. Proto byly navrženy a vyrobeny nové přechodky. Po následném roztočení soustavy došlo ke zničení motoru kvůli nevhodnosti jeho použití pro tuto soustavu. Byl vybrán nový motor a kvůli jeho rozdílným rozměrům proti původnímu motoru byla navržena a vyrobena spojka se soustavou. Provedením těchto změn bylo dosaženo funkčnosti mechanické části soustavy.

Dalším krokem byl návrh a výroba redukce pro připojení průtokoměru k ventilátoru a osazení zařízení třemi teplotními čidly. Pro automatické čtení hodnot bylo v Matlabu vytvořeno GUI využívající vývojovou desku Arduino Uno. Aby byl plně pokryt rozsah AD převodníku Arduina, byl výstupní signál z čidel zesílen. Dále bylo zařízení vybaveno měřením otáček Hallovou sondou. Výstupní signál z průtokoměru byl zesílen kvůli lepšímu rozlišení a spolu s ostatními hodnotami vykreslen v grafech. Pro možnost řízení rychlosti otáček motoru bylo zařízení vybaveno spínacím modulem a bylo vytvořeno ovládání topného výkonu spirály za účelem dosažení požadované teploty. Z důvodu zvýšení bezpečnosti byla spojka opatřena krytem. Pomocí výše zmíněných kroků bylo vytvořeno zařízení plně říditelné z počítače, s grafickým a datovým výstupem měřených dat.

Dále bylo provedeno testovací měření pro zjištění odvedeného výkonu konkrétní konfigurací mezikruží a ventilátoru, při kterém byly získány hodnoty odvedeného tepla pro tři provozní stavy napájení motoru.

Výsledkem této práce je plně funkční zařízení pro testování chlazení rotoru dutou hřídelí, umožňující změnu konfigurací ventilátoru, vnitřní trubky a duté hřídele do průměru 30 mm.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] SPEED 700 BB Turbo 12 V, HIGH SPEED. *Domanský Profimodel* [online]. Praha [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: https://profimodel.cz/cs/stejnoserne/41014-graupner-speed-700-bb-turbo-12-v-4013389571029.html?gclid=Cj0KCQjwkZiFBhD9ARIsAGxFX8AIYYAZ2yCVKmnq-jpYekVuA7vQYsfBNnuv4oCXP9lZ2IjPBz53xoYaAjdSEALw_wcB
- [2] MY1036 350 W. *Zhejiang Union Electric Co.* [online]. Chengxi [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: http://unitemotor.com/index.php/Home/Index/product_detail/id/192/page/1
- [3] *VDI-Wärmeatlas: Berechnungsblätter für den Wärmeübergang* [online]. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1957 [cit. 2021-5-20].
- [4] BUDAJ, Florian. *Parní kotle: podklady pro tepelný výpočet*. 3. nezm. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1986. Učební texty vysokých škol.
- [5] National Semiconductor. [online katalogový list]. LM35. ©2000 [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.313-909.1.pdf>
- [6] Arduino Uno Rev3. *HWKITCHEN* [online]. Šenov [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://www.hwkitchen.cz/arduino-uno-rev3/>
- [7] Matlab Support Package for Arduino Hardware. *MathWorks* [online]. c1994-2021 [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/supportpkg/arduinoio/index.html>
- [8] Fairchild Semiconductor. [online katalogový list]. LM358. ©2010. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.310-517.1.pdf>
- [9] MICROCHIP. [online katalogový list]. MCP6002-I/P. ©2009. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: https://www.tme.eu/Document/c98656c49a036767b89c9bb93e3dda4a/mcp6001_2_4.pdf
- [10] Techometer/RPM Measure. *ForbiddenBit* [online]. ForbiddenBit, 2020 [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <https://forbiddenbit.com/en/arduino-projects/tachometer-rpm-measure/>
- [11] Write and read I2C on Arduino. *MATLAB Answers* [online]. 2020 [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/answers/511994-write-and-read-i2c-on-arduino>
- [12] Tabulka ASCII. *Servis PC Kupka* [online]. Těrlícko, c2012-2021 [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <http://www.servispckupka.cz/tabulka-ASCII-znaku.php>
- [13] PWM modul 400 W. *HADEX, spol. s r.o.* [online]. Ostrava [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://www.hadex.cz/m369-vykonovy-spinac-mosfet-pwm-15a-400w-modul-xy-mos/>
- [14] TSI 4040 Mass Flowmeter Manual. *Kenelec Scientific* [online]. 2016. Mitcham [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: https://www.kenelec.com.au/wp-content/uploads/2018/03/TSI_4040_4043_4045_Mass_Flowmeter_Manual.pdf
- [15] Create user interface control. *MathWorks Help Center* [online]. MathWorks, c1994-2021 [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/uicontrol.html>

- [16] Cosmo Electronics Corporation. [online katalogový list]. KSD215AC8. ©2000 [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.635-026.1.pdf>
- [17] How to generate an event in Matlab every second. *MATLAB Answers* [online]. MATLAB Answers, 2018 [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/answers/396472-how-to-generate-an-event-in-matlab-every-second>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

PLA	kyselina polymléčná
GUI	grafické uživatelské rozhraní
I2C	Inter-Integrated Circuit
ASCII	American Standard Cod efor Information Interchange
PWM	pulsně-šířková modulace
ADC	analog-digital převodník

d	průměr	$[d] = \text{mm}$
U	napětí	$[U] = \text{V}$
I	proud	$[I] = \text{A}$
P	výkon	$[P] = \text{W}$
n	otáčky	$[n] = \text{min}^{-1}$
p	tlak	$[p] = \text{Pa}$
w	rychlost	$[w] = \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
Q	průtok	$[Q] = \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
S	plocha	$[S] = \text{m}^2$
ρ	hustota	$[\rho] = \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
t	teplota	$[t] = ^\circ\text{C}$
f	frekvence	$[f] = \text{Hz}$
R	odpor	$[R] = \Omega$
C	kapacita	$[C] = \text{F}$
τ	časová konstanta	$[\tau] = \text{s}$
c_p	měrná tepelná kapacita při stálém tlaku	$[c_p] = \text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$

SEZNAM OBRÁZKŮ

1	Původní zařízení	11
2	Různé prototypy ložiskových přechodek.....	15
3	Prototyp spojky	17
4	Spojka hřídele a motoru.....	17
5	Úryvek o tlakových ztrátách v konfuzoru z VDI-Wärmeatlas	18
6	Schematický nákres polovičního řezu konfuzoru.....	18
7	Schéma zapojení zesilovače signálu z teplotního čidla	21
8	Deska zesilovače signálu z teplotního čidla	22
9	Kompaktní modul pro měření otáček se stojánkem	24
10	Ukázka GUI.....	27
11	Kryt spojky	28
12	Finální podoba zařízení.....	30
13	Průběhy měřených veličin při testovacím měření	32

SEZNAM TABULEK

1	Parametry původního motoru	12
2	Parametry nového motoru.....	16
3	Parametry teplotního čidla LM35DZ.....	19
4	Nejdůležitější parametry Arduina.....	20
5	Ustálené hodnoty z testovacího měření	31

SEZNAM ELEKTRONICKÝCH PŘÍLOH

Příloha 1: GUI.m

Příloha 2: RPM_meter.ino